

# 진공단열체 지지대의 모델링 및 형상 최적화 Modeling and Shape Optimization of Vacuum Insulator support

\*이기욱<sup>1</sup>, #조성욱<sup>1</sup>, 김종민<sup>2</sup>, 김승욱<sup>1</sup>, 송태호<sup>2</sup>

\*K. W. Lee<sup>1</sup>, #S. W. Cho(scho@cau.ac.kr)<sup>1</sup>, J.M.Kim<sup>2</sup>, S.W.Kim<sup>1</sup>, T.H.Song<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>중앙대학교 기계공학부, <sup>2</sup>한국과학기술원

Key words : Thermal Resistance, Safety Factor, Shape Optimization

## 1. 서론

현재 소비되고 있는 에너지의 절반은 건물의 냉난방에 사용되고 있다. 이런 에너지 손실을 1/4 정도로 줄이면 우리가 겪어야 하는 에너지부족과 이산화탄소배출 문제를 동시에 해결할 수 있다. 그러므로 진공 단열체 처럼 에너지손실을 줄일 수 있는 기본적인 혁신적인 방법이 가장 효과적인 것이라고 볼 수 있다. 본 연구에서는 최적화 기법을 적용하여 진공 단열체를 지지하는 구조체의 수학적 모델링과 형상최적화를 수행하였다. 이를 위하여 다양한 형태의 구조체 형상을 제안하고 이들의 응력분포, 열전달 특성, 좌굴여부를 고려하였다. 제시된 구조체는 진공 상태의 특성상 상, 하 면에 작용하는 대기압을 견디면서 동시에 열저항이 높은 구조물 설계에 중점을 두었다. 따라서 열저항을 구조물의 최적 설계 목표로 결정하였다.

구조물 내의 응력은 식(1) ~ 식(3)과 같이 반경방향, 축 방향, 회전방향의 세 가지 성분으로 표현 할 수 있다.

$$\sigma_z = \frac{F_A}{A} + \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (P_i = 0, P_o = 0) \quad , \quad axial \ stress \ (1)$$

$$\sigma_r = -P_i \quad (P_i = 0) \quad , \quad radial \ stress \ (2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{(r_o^2 + r_i^2)P_i - r_o^2 P_o}{r_o^2 - r_i^2} \quad (P_i = 0, P_o = 0) \quad , \quad hoop \ stress \ (3)$$

여기서  $F_A$ 는 구조물의 상단에 가해지는 총 힘을 말하며  $P_i, P_o$ 는 반경방향의 압력을 의미한다. 또한  $r_o, r_i$ 는 각각 축 방향 형상의 반지름이다. 구조물 내부가 진공상태이기 때문에 형상(1), (2), (3)의 축 방향 응력성분은 식(4)와 같이 표현되며 나머지 방향 성분은 존재하지 않는다.

$$\sigma_i = \frac{F}{A_i} = \frac{F}{2\pi r m t_i} \quad \left( \begin{matrix} F = \text{일정} \\ i = 1, 2, 3 \end{matrix} \right) \quad (4)$$

축대칭 형상 열 저항의 수학적 모델링은 식(5)와 같은 축방향성분과 식(6)-(7)과 같은 반경방향 성분의 조합으로 표현할 수 있다.

$$Q = -kA \frac{\Delta T}{L} (w) \Rightarrow R = \frac{L}{kA} (c/w) \quad (5)$$

$$Q_{cond, cyl} = 2\pi L k \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_2 / r_1)} (w) = \frac{T_1 - T_2}{R} \quad (6)$$

$$R_{cyl} = \frac{\ln(r_2 / r_1)}{2\pi L k} \quad (7)$$

여기서  $r_2, r_1$ 은 Z 축 기준으로 반지름을 말하며 따라서 구조물의 총 열 저항은 식(8)과 같이 표현된다.

## 2. 수학적 모델링

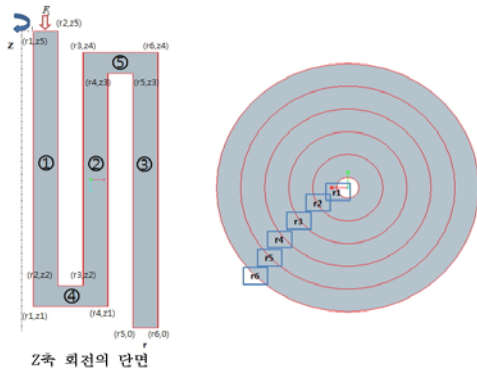


Fig. 1 Axial symmetry

본 연구 대상은 Fig. 1 과 같이 축대칭 형상이며 열전달 경로를 최대화할 수 있는 형상이다. 따라서

$$\therefore R_{total} = \frac{L_1}{k_1 A_1} + \frac{L_3}{k_1 A_3} + \frac{L_5}{k_1 A_5} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2\pi L_4 k_1} + \frac{\ln \frac{r_5}{r_4}}{2\pi L_5 k_1} \quad (8)$$

### 3. 형상최적화

수학적 모델링에서 결정된 변수를 최적화 기법의 입력변수로 사용하였으며 ansys 13.0을 이용하여 형상최적화를 수행하였다. 형상최적화의 최종 목표는 열 저항 값의 최대화이다. 따라서 가혹한 안전계수를 설정하여 열 저항을 극대화 하는 형상을 찾는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 ansys의 실험계획법과 반응 표면 (response surface) 기법을 사용하였다. 반응 표면은 입력변수에 대한 모든 설계점을 계산하는 것이 아니라 몇 개의 대표적인 점을 계산하고 나머지는 회귀분석을 통한 반응표면을 생성하기 때문에 계산 시간을 절약하면서 비교적 정확한 값을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 재료는 열전도계수와 항복응력을 고려하여 polycarbonate로 정하였다. 또한 높이의 제한 조건을 고려하여 컨벡스 헐 (convex hull) 을 정하였고 형상이 유지될 수 있는 최대한의 구속조건을 사용하여 15개의 입력변수를 사용하였다. 목적함수는 열 저항으로 선택하여 가장 적절한 후보군을 찾을 수 있었다. 또한 단열체 내부는 진공이기 때문에 최소 1기압 이상에서 안전해야한다. 그렇기 때문에 내부에 들어가는 지지대의 개수에 따라 지지하는 힘, 형상의 크기, 두께, 볼륨등도 다를 수 있다. 즉 단열체 지지대의 개수에 따라서 각각의 최적화 작업을 진행하였고 최대의 열 저항 값을 갖는 형상을 찾는 과정을 수행하였다.

### 4. 결론

각각의 최적화작업을 수행한 결과 Fig. 2 에서와 같이 10×10의 형상이 가장 좋은 열 저항 이라는 것을 찾을 수 있었다. 또한 형상의 응력분포가 균일하면서 볼륨이 작아질수록 높은 열 저항 값을 갖는다. 따라서 본 연구진은 Fig. 3의 최적화 결과에서 응력이 과도하게 조금 길리는 부분을 제거하는 세부적인 형상 최적화 과정을 진행하였다. 그 결과 Fig. 3 에서와 같이 처음 결과보다 볼륨은 20% 작아지고 열 저항은 10% 향상됨을 알 수 있었다. 또한 Fig. 3 에서와 같이 linear buckling 해석 결과 입력의 2배의 하중부터 부터 buckling이 진행됨을 알 수 있었다. 즉 본 연구에서는 수학적 모델에서

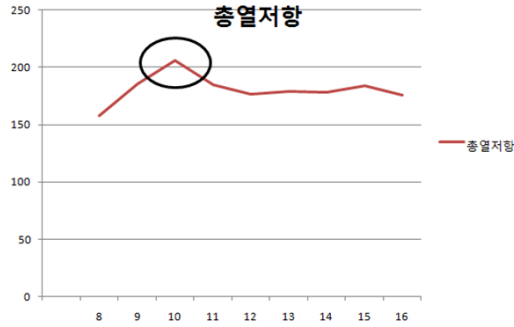


Fig. 2 Thermal resistance

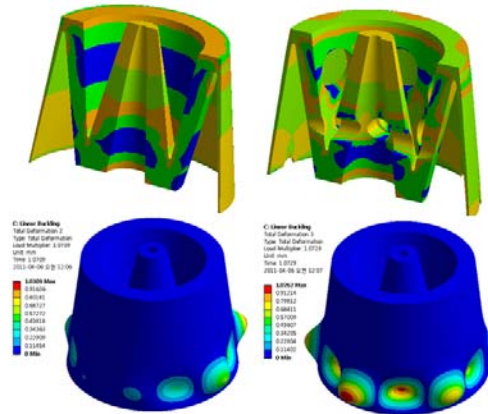


Fig. 3 distribution of safety factor(top) and Buckling results(bottom)

얻은 변수를 기준으로 형상최적화를 진행한 결과 1기압의 대기압을 견디고 안전율, 좌굴을 만족 하면서 열저항이 극대화된 형상을 찾을 수 있었다.

### 후기

본 연구는 VIP 슈퍼단열체용 다중왕복지지체 (중견연구자지원사업)의 지원으로 수행되었으며 이에 교육과학기술부에 감사를 드립니다.

### 참고문헌

1. Kwon, J.S., Jang, C.H., and Song, T.H., "Effective thermal conductivity of various filling materials for vacuum insulation panels," Int. J. Heat Mass Transfer, 52, 5525-5532, 2009.
2. 임표, 양균의, "반응표면법을 이용한 5축 임펠러 정삭 가공의 최적화," 대한기계학회지, 31, 924-933, 2007.